

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Monitorování lokální distribuční sítě
podniku a provedení analýzy naměřených dat**
**Monitoring of local network and analyses of
measured data**

2015

Bc. Miroslav Morcinek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal informace.

V Ostravě

7. května 2015


.....

Miroslav Morcinek

Poděkování

Rád bych těmito několika řádky poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Kolářovi, Ph.D. za jeho cenné rady a informace v průběhu realizace diplomové práce a za konzultace v rámci Dopravního podniku Ostrava a. s. panu Ing. Jiřímu Plačkovi.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Morcinek**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Monitorování lokální distribuční sítě podniku a provedení analýzy
naměřených dat**
Monitoring of local network and analyses of measured data

Zásady pro vypracování:

Teoretická část:

- klasifikace sítí VN, NN
- kvalita el. energie dle ČSN
- rozbor problematiky měření kvality el. sítí

Praktická část:

- provedení měření v rámci lokální distribuční sítě
- analýza naměřených dat
- zhodnocení stavu sítě na základě naměřených hodnot

Technické a ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

Radomír Turča, Vyhodnocení poklesů napětí z měření ve více bodech distribuční sítě

Richard Drechsler, 1909-1988 Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu
tyristorových zařízení : vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru

Václav Macháček, Elektrické přípojky z vedení distribuční soustavy a připojování konečných zákazníků

Zdeněk Hradílek, Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení

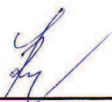
Normy ČSN

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Kolář, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se ve své teoretické části zabývá rozbořem jednotlivých vybraných parametrů sítě dle normy ČSN EN 50160. Praktická část diplomové práce se zabývá vyhodnocením naměřených dat v měnirně USM XXI v areálu vozovny Dopravního podniku Ostrava v Ostravě - Porubě, na základě stížností na časté výpadky počítačové techniky.

Klíčová slova

elektrická energie, harmonické napětí, kvalita napětí, kolísání napětí, flikr, frekvence, nesymetrie napětí, elektromagnetická kompatibilita;

Abstract

This thesis in theoretical part deals with analysis of selected network parameters according to EN 50160. The practical part of the thesis deals with the evaluation of the measured data in the substation USM XX1 the depot's premises in Ostrava Transport Company Ostrva Poruba, based on complaints about failures of computer technology.

Keywords

electric power, voltage harmonics, voltage quality, voltage fluctuations, flicker, frequency, voltage unbalance, electromagnetic compatibility;

Obsah

1	Úvod	1
2	Kvalita elektrické energie	2
2.1.1	Kmitočet sítě	4
2.1.2	Velikost napájecího napětí	5
2.1.3	Odchytky napájecího napětí	5
2.1.4	Rychlé změny napětí	6
2.1.5	Míra vjemu flikru	6
2.1.6	Krátkodobé poklesy napájecího napětí	7
2.1.7	Krátkodobé přerušení napájecího napětí	7
2.1.8	Dlouhodobá přerušení napájecího napětí	7
2.1.9	Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí	9
2.1.10	Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí	9
2.1.11	Nesymetrie napájecího napětí	10
2.2	<i>Neharmonické průběhy</i>	12
2.2.1	Základní pojmy	13
2.2.2	Elektromagnetická kompatibilita (EMC)	16
2.2.3	Způsoby odstranění vyšších harmonických	17
2.2.4	Metody zjištění vyšších harmonických v síti	19
3	Přehled analyzátorů firmy BK Elcom	22
3.1	ENA510 (PMU + PQA)	22
3.2	PNA571	23
3.3	ENA075	24
3.4	ENA330 (PQA)	25
3.5	ENA440 (PQA)	26
4	Měření kabelové trasy měřírny USMXXI	27
4.1	<i>Popis měřicího hardwaru</i>	27
4.1.1	Přípravek s převodníkem USB6210	27
4.2	<i>Popis měřicího softwaru</i>	28
4.2.1	Aplikace pro dlouhodobé měření	28
4.2.2	Aplikace pro prohlížení naměřených dat	29
4.2.3	Aplikace pro základní analýzu naměřených dat	29
4.3	<i>Měření kabelové trasy měřírny</i>	30
4.4	<i>Vyhodnocení naměřených dat</i>	34
4.4.1	Efektivní hodnota napětí	34
4.4.2	Harmonické napětí	36

4.4.3	Fázový posun první harmonické.....	39
4.4.4	Průběh výkonu	41
5	Závěr.....	44

Seznam použitých symbolů a zkratek

CFL	předřadníky kapacitních svítidel
$\cos\varphi$	účinník
ČSN	česká technická norma
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EN	evropská norma
L1	fáze 1
L2	fáze 2
L3	fáze 3
MN	malé napětí
NN	nízké napětí
P	činný výkon
plt	dlouhá doba vjemu flikru
pst	krátkodobá míra vjemu flikru
Q	jalový výkon
SMPS	spínané napájecí zdroje
THD	činitel zkreslení
THD	celkové zkreslení sinusového průběhu
TV	transformátor vozovny
Un	jmenovité napětí
UPS	zdroje nepřetržitého napájení
UPS	zdroje nepřetržitého napětí
Urms	efektivní hodnota napětí
USM XXI	usměrňovač 21
VVN	velmi vysoké napětí

Seznam obrázků

Obrázek 1.: Perioda sinusového napětí	4
Obrázek 2: a) symetrická soustava b) nesymetrická soustava.....	10
Obrázek 3: Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou.....	13
Obrázek 4: Spektrum harmonických standardního PC.....	14
Obrázek 5: Základní schéma elektromagnetické kompatibility	16
Obrázek 6: elektromagnetická kompatibilita.....	17
Obrázek 7: Schéma filtrace harmonických proudů paralelními rezonančními filtry.....	18
Obrázek 8: Síťový analyzátor ENA510 (PMU + PQA).....	22
Obrázek 9: Síťový analyzátor PNA571.....	23
Obrázek 10: Síťový analyzátor model ENA075.....	24
Obrázek 11: Síťový analyzátor ENA330 (PQA).....	25
Obrázek 12: Síťový analyzátor ENA440 (PQA).....	26
Obrázek 13.: Schéma vnitřního zapojení přípravku USB6210	27
Obrázek 14.: Přípravek USB6210 uložený v krabici.....	28
Obrázek 15.: Program pro dlouhodobé měření – čelní panel	29
Obrázek 16.: Jednopolové schéma měřírny USM XXI Poruba.....	30
Obrázek 17.: VN napájecí schéma měřírny USM XXI.	31
Obrázek 18.: Transformátor vozovny v měřírny Poruba.	32
Obrázek 19.: Přívodní kobka z měřírny v rozvaděči vozovny.....	32
Obrázek 20.: Odvodní kabely do rozvaděče autobusů	33
Obrázek 21.: Měřící místo v rozvaděči.	33
Obrázek 22.: Topologie vozovny	34
Obrázek 23.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L1.....	34
Obrázek 24.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L2.....	35
Obrázek 25.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L3.....	35
Obrázek 26.: Průběhy napětí ve fázích L1, L2 a L3.....	35
Obrázek 27.: Průběh 3. harmonické napětí.	36
Obrázek 28.: Průběh 5. harmonické napětí.	37

Obrázek 29.: Průběh 7. harmonické napětí.	37
Obrázek 30.: Časové průběhy napětí a proudu za tři periody ve fázích L1, L2 a L3.....	37
Obrázek 31.: Průběh účinníku první fáze za prvních 12 hodin měření	39
Obrázek 32.: Průběh účinníku druhé fáze za prvních 12 hodin měření.....	40
Obrázek 33.: Průběh účinníku třetí fáze za prvních 12 hodin měření	40
Obrázek 34.: Průběhy účinníku ve všech fázích za prvních 12 hodin měření.....	40
Obrázek 35.: Průběh činného výkonu ve fázi L1	41
Obrázek 36.: Průběh činného výkonu ve fázi L2	41
Obrázek 37.: Průběh činného výkonu ve fázi L3	42
Obrázek 38.: Průběhy výkonů P1, P2 a P3.....	42
Obrázek 39.: Průběh jalového výkonu ve fázi L1	42
Obrázek 40.: Průběh jalového výkonu ve fázi L2	43
Obrázek 41.: Průběh jalového výkonu ve fázi L3	43
Obrázek 42.: Průběhy jalových výkonů Q1, Q2 a Q3	43

Seznam tabulek

Tabulka 1.: Způsoby připojení k propojnému systému	5
Tabulka 2: Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech Un pro řády harmonických až do 25.	15
Tabulka 3.: Značení přívodních linek DPO a ČEZ	31
Tabulka 4.: Tabulka maximálních a minimálních hodnot v jednotlivých fázích.	36
Tabulka 5.: 95% hodnoty harmonických napětí.....	38
Tabulka 6.: 95% hodnoty harmonických proudů.	39
Tabulka 7.: Maximální a minimální hodnoty účinníku za celou dobu měření.....	41

1 Úvod

V dnešní době je život člověka velmi závislý na elektrické energii a s trochou nadsázky bychom mohli říci, že je to ta nejdůležitější energie na světě. Můžeme ji snadno přeměňovat na jinou formu (např.: světlo, teplo). Elektřina je přítomna všude kolem nás, ať již vyrobená v elektrárnách, tak v přírodě v podobě blesků nebo bioelektřiny, která vzniká ve všech živých organizmech.

Praktickým využitím elektrické energie, její výrobou, rozvodem a přeměnou na jiné druhy energie se zabývá technický vědní obor nazývaný elektrotechnika.

Jedním z hlavních nedostatků elektrické energie patří provázanost její výroby na její spotřebu. Hlavně nemožnost jejího skladování. V elektrárnách dochází k přeměně nějaké primární energie na energii elektrickou. Podle druhu dodávané primární energie rozlišujeme několik typů elektráren.

- Jaderné elektrárny
- Tepelné elektrárny
- Větrné elektrárny
- Vodní elektrárny
- Sluneční elektrárny

V elektrárnách musí být elektrická energie vyráběna v kvalitě, která je dána normou. Prostřednictvím rozvodných a distribučních sítí je následně dodávána koncovým odběratelům. V této diplomové práci jsou popsány základní definice, specifikace a charakteristiky elektrické energie dle normy ČSN EN 50160, která uvádí hlavní charakteristiky napětí v místech připojení odběratelů z veřejných distribučních sítí nízkého a vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Norma udává meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv odběratel.

2 Kvalita elektrické energie

Elektrickou energii získáváme v elektrárnách pomocí elektromagnetické indukce v generátorech. Elektřina dále putuje z elektráren pomocí přenosových a distribučních sítí až k odběratelům. Pro snížení ztrát, které vznikají při přenosu velkých proudů, se používají sítě s velkým napětím až 400 kV, ale malým proudem. Pomocí vyššího napětí zvyšujeme přenášený výkon, aniž bychom zvýšili ztráty při přenosu sítí.

Požadavky kladené na elektrické sítě:

- bezpečný provoz
- provozní spolehlivost
- přehlednost (možnost rychlého odstranění poruchy)
- hospodárnost provozu
- možnost rozšiřování elektrických rozvodů a jejich modernizace
- unifikace jednotlivých částí rozvodů

Sdružené hodnoty napětí mezi vodiči:

- MN – malé napětí – do 50V
- NN – nízké napětí – do 1000V
- VN – vysoké napětí – do 52 kV
- VVN – velmi vysoké napětí – do 300 kV
- ZVN – zvlášť vysoké napětí – do 800 kV
- UVN – ultra vysoké napětí – nad 800 kV

Přenosová soustava:

Je systém zařízení, která zajišťují přenos elektrické energie od výrobců k odběratelům. Přenosovou soustavu v České republice provozuje státní společnost ČEPS, a. s. [9]

Napěťové hladiny:

- 400 kV
- 220 kV
- částečně 110 kV

Distribuční soustava:

Distribuční soustava zajišťuje rozvod elektrické energie z přenosové soustavy jednotlivým koncovým uživatelům. Největším provozovatelem na území České republiky je společnost ČEZ Distribuce, a. s.

Napěťové hladiny:

- částečně 110 kV
- 35 kV
- 22 kV
- 10 kV
- 6 kV
- 0.4 kV

Odběratel elektrické energie požaduje dodržení parametrů dodávky energie a dodání elektrické energie v požadovaném množství a kvalitě. [9] [1]

Parametry jsou:

- kmitočet sítě
- velikost napájecího napětí
- odchylky napájecího napětí
- rychlé změny napětí
- míra vjemu flikru
- krátkodobé poklesy napájecího napětí
- krátkodobá přerušení napájecího napětí
- dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí
- nesymetrie napájecího napětí
- harmonické zkreslení napětí, nebo harmonické napětí

Při přenosu působí na elektrickou energii mnoho vnějších vlivů, které zhoršují kvalitu a dodávku elektrické energie.

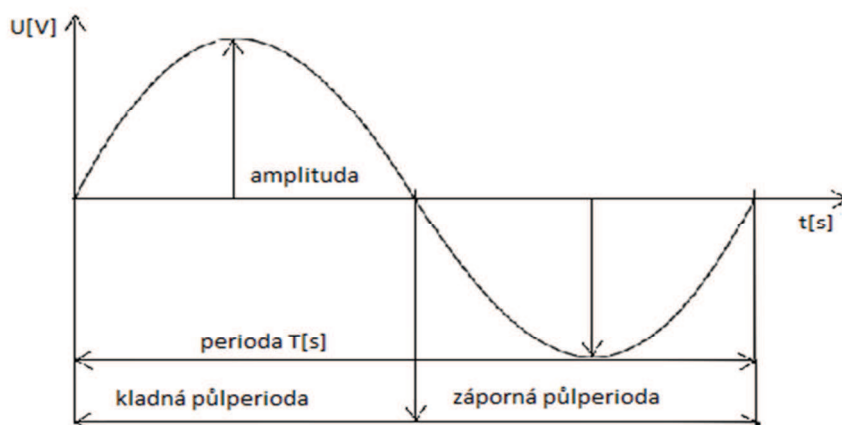
Například:

- atmosférické vlivy.
- vlivy způsobené používáním některých elektrických spotřebičů.
- působení ochran a automatizačních prostředků.
- časté spínání velkých spotřebičů

Kvalita elektrické energie je udávána provozními charakteristikami, které musí garantovat provozovatel dané sítě jako například: [9] [1]

2.1.1 Kmitočet sítě

Otáčením závitu v magnetickém poli se na koncích závitu naindukuje střídavé napětí s maximální amplitudou U_m . Zobrazíme-li závislost tohoto napětí na čase dostaneme sinusoidu. Nejkratší doba, po kterou se průběh napětí opakuje, se jmenuje perioda T a je to doba, za kterou proběhne jeden kmit, jednotkou periody T je jedna sekunda. Tím pádem frekvence nám udává počet kmitů za jednu sekundu.



Obrázek 1.: Perioda sinusového napětí

$$T = \frac{1}{f} (s) \quad (2-1.)$$

$$f = \frac{1}{T} (Hz) \quad (2-2.)$$

Frekvence je základním systémovým parametrem a je v každém okamžiku stejná, protože zdroje pracují synchronně. Jmenovitý kmitočet napájecího napětí musí být 50 Hz, který je normován v celé Evropě.

Kmitočet napájecí sítě je primárně dán otáčkami generátoru a sekundárně pak závisí na výkonové bilanci

Výkon dodávaný elektrárnou = odebíranému výkonu	⇒ stálá frekvence
Výkon dodávaný elektrárnou > odebíraný výkon	⇒ frekvence roste
Výkon dodávaný elektrárnou < odebíraný výkon	⇒ frekvence klesá

Norma ČSN EN 50160 dále rozlišuje dvě skupiny systémů dle způsobu připojení k propojnému systému. [5] [2]

Tabulka 1.: Způsoby připojení k propojnému systému

systémy se synchronním připojením k propojnému místu		
50 Hz±1%	(tj. 49,5Hz...50,5 Hz)	během 99,5% roku
50 Hz +4% / -6%	(tj. 47 Hz...52 Hz)	po 100% času
systémy bez synchronního připojení k propojnému místu (tj. ostrovní systémy)		
50 Hz±2%	(tj. 49Hz...51 Hz)	během 99,5% roku
50 Hz±15%	(tj. 42,5Hz...57,5 Hz)	po 100% času

2.1.2 Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dána dohodnutým napájecím napětím U_c . Za normálních provozních podmínek s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu daných normou. [2]

2.1.3 Odchylky napájecího napětí

Vyšší napětí než napětí jmenovité má za následek zkrácení životnosti izolace spotřebiče. Při nižším napětí zase dochází k výraznému poklesu výkonu zařízení, jeho špatné funkci či úplnému vypnutí. [2] [8]

Původ odchylek napětí:

spínání velkých zátěží jako např.: transformátory, motory, obloukové pece, svařovací technika, kompenzační kondenzátory.

Způsoby odstranění poklesů:

- připojením do sítí s dostatečným zkratovým výkonem

- zvětšením zkratového výkonu
- omezením souběžného chodu rušících zařízení
- změnou způsobu rozběhu motorů
- kompenzací (standardní, sériovou)

Během každého týdne musí být 95% průměrných hodnot vysokonapěťových i nízkonapěťových charakteristik napájecího napětí v rozsahu $\pm 10\%$.

2.1.4 Rychlé změny napětí

Rychlé změny napájecího napětí jsou způsobeny především spínáním zařízení v sítí nebo odběrateli energie. Za normálních podmínek nepřekračují hodnotu 5% u nízkonapěťových charakteristik a vysokonapěťových všeobecně nepřekračují 4%. [2]

2.1.5 Míra vjemu flikru

Flikr může způsobit kolísání napětí v distribučních soustavách nízkého napětí. Rychlé periodické kolísání napětí se projevuje na světelných spotřebičích rychlou změnou světelného toku a způsobuje změnu zrakového vnímání. Míra vjemu flikru se měří dle normy ČSN IEC 61000-4-15. Udává specifikaci funkce a dimenzování pro měřicí přístroj blikání určený k indikování správné úrovně vnímání blikání pro všechny prakticky se vyskytující tvary vlny kolísání napětí.

P_{st} = krátkodobá míra vjemu flikru:

Nepříznivý vjem flikru, který se vyhodnocuje po krátkou dobu. Index „st“ je zkratka z anglického názvu „short term“ = krátkodobý. Hodnota P_{st} se získává z měření v 10 minutových intervalech.

P_{lt} = dlouhodobá míra vjemu flikru:

Nepříznivý vjem flikru vyhodnocený po dlouhou dobu. Index „lt“ je zkratka z anglického názvu „long term“ = dlouhodobý. Hodnota P_{lt} se získává z měření po dobu dvou hodin a odvozuje se z dvanácti po sobě jdoucích hodnot P_{st} . Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru $P_{lt} \leq 1$. [2] [4]

$$P_k = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{si}^3}{12}}$$

(2-3.)

Původ:

- spínání velkých zátěží jako např.: pohony s motory, obloukové pece, bojler, svařovací stroje, mlýny.

Důsledky:

- fyziologické na lidský organismus (vizuální, nervové)

Řešení:

- změnou typu osvětlení
- instalací UPS (náhradního zdroje)
- zvětšením zkratového výkonu

2.1.6 Krátkodobé poklesy napájecího napětí

Krátkodobé poklesy jsou obecně způsobeny zkraty v zařízeních odběratelů nebo ve veřejné distribuční síti. Četnost jejich výskytu za rok se značně mění podle typu rozvodné sítě a bodu sledování. Většina poklesů má dobu trvání kratší než 1 sekunda a hloubku poklesu menší než 60%. V některých oblastech se mohou velmi často vyskytovat poklesy s hloubkou mezi 10% - 15% Un jako následek spínání velkých zátěží u odběratelů. [2]

2.1.7 Krátkodobé přerušení napájecího napětí

Průměrný výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí je v rozsahu od několika desítek až do několika stovek ročně. Přibližně 70% přerušení bývá kratších než 1 sekunda.

2.1.8 Dlouhodobá přerušení napájecího napětí

Jsou obvykle způsobená vnějšími vlivy nebo událostmi, kterým nemůže dodavatel zabránit nebo jim předcházet a proto není možné přesně vyčíslit počet a dobu trvání poruch. To

je způsobeno velkými rozdíly v uspořádání a struktuře elektrických sítí a nepředvídatelnými dopady povětrnostních a jiných vlivů.

Původ:

- poruchy v přenosové a distribuční soustavě
- spínání zátěží velkých výkonů
- vlivy počasí na venkovní vedení

Důsledky:

Nejzávažnější vliv mají v těchto odvětvích:

- výrobní linky
- zabezpečovací systémy
- nemocnice, letiště
- počítačové sítě

Řešení:

- cílenou preventivní údržbou
- modernizací sítě
- vhodným a správně naddimenzovaným jištěním a jeho selektivitou
- zvyšováním odolnosti řídicích systémů

2.1.9 Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí

Dočasná přepětí se objevují během poruch ve veřejné distribuční síti nebo v instalaci odběratele a zmizí, jakmile je porucha opravena. Obvykle mohou tyto poruchy dosáhnout hodnoty sdruženého napětí.

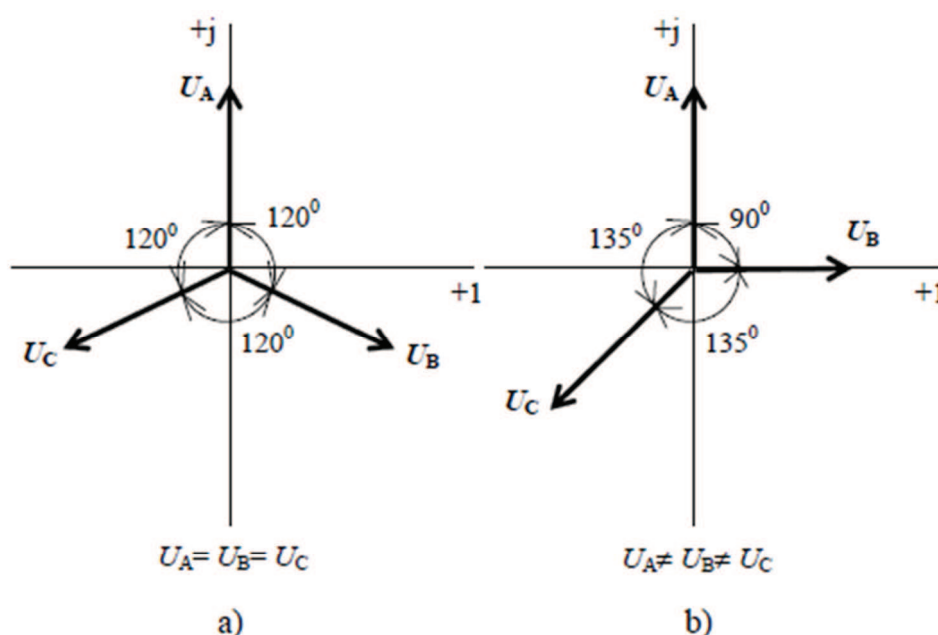
2.1.10 Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Přechodná přepětí většinou nepřekračují hodnotu 6 kV, náhodně se můžou vyskytnout hodnoty i vyšší. Doby čela přepětí jsou velmi různé od několika mikrosekund po méně než milisekundu.

2.1.11 Nesymetrie napájecího napětí

Příčinou nesymetrie jsou nesymetrická jednofázová zařízení mezi fází a středním vodičem nebo mezi fázemi s nedostačujícím rozložením do všech tří fází sítě.

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sousledné složky. Nesymetrie způsobuje například zvýšený ohřev transformátorů a zvýšení výkonových ztrát. [1] [2]



Obrázek 2: a) symetrická soustava b) nesymetrická soustava

Důsledky:

- tepelné přetěžování 3-fázových asynchronních a synchronních motorů
- zvýšení ztrát v regulovaných pohonech, v rozvodných sítích

Řešení:

- vyvážením 1-fázových zátěží na všechny tři fáze
- snížením impedance rozvodu
- instalací odpovídajících ochran strojů
- elektronickou kompenzací a regulací napětí

- připojením symetrizačních členů pro 1-fázové zátěže
- u střídavých trakcí použitím speciálních transformátorů

Trojfázové nesouměrné soustavy se rozkládají nejčastěji pomocí Fortescua (1918) a to na soustavy napěťové, proudové a soustavy parametrů vedení. [9] [1]

Metoda vychází z existence tří souměrných složek soustavy:

- soustava sousledná (synchronní) - stejný sled fází
- soustava zpětná (inverzní) - opačný sled fází
- soustava netočivá (nulová) [9]

Sousledná složka:

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}_U + a \cdot \bar{U}_V + a^2 \cdot \bar{U}_W}{3} \quad (2-4.)$$

Zpětná složka:

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}_U + a^2 \cdot \bar{U}_V + a \cdot \bar{U}_W}{3} \quad (2-5.)$$

Netočivá složka:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{U}_U + \bar{U}_V + \bar{U}_W}{3} \quad (2-6.)$$

„a“ je operátor, pro který platí:

$$a = 1 \angle \frac{2\pi}{3} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2-7.)$$

$$a^2 = 1 \angle \frac{4\pi}{3} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2-8.)$$

Obdobně lze použít i zpětnou transformaci pomocí inverzní matice.

Zpětný přepočet na nesymetrickou soustavu:

$$\bar{U}_U = \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \quad (2-9.)$$

$$\bar{U}_V = \bar{U}_0 + a^2 \cdot \bar{U}_1 + a \cdot \bar{U}_2 \quad (2-10.)$$

$$\bar{U}_W = \bar{U}_0 + a \cdot \bar{U}_1 + a^2 \cdot \bar{U}_2 \quad (2-11.)$$

Maticový zápis předešlých vztahů.

$$\begin{bmatrix} \bar{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_U \\ \bar{U}_V \\ \bar{U}_W \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{U}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} \quad [F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2-12.)$$

F je Fortescuova matice a jejím determinantem pak je

$$[F] = 3 \cdot j \cdot \sqrt{3} \quad (2-13.)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U} \end{bmatrix} = [F] \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_F \end{bmatrix} \quad (2-14.)$$

Stejným způsobem je možné použít tuto metodu i při analýze proudů v soustavě. Symetrické poklesy napětí v napěťové soustavě obsahují pouze souslednou složku. Nesymetrické poklesy, se skládají ze sousledné a zpětné složky. [9]

2.2 Neharmonické průběhy

Za normálních podmínek mají spotřebiče odebírat sinusový proud s konstantní amplitudou a frekvencí. Ve skutečnosti však spotřebiče odebírají nesinusový neharmonický zátěžný proud, kterým deformují sinusovku napětí. Tomuto jevu se také říká zpětné působení na síť. Nejčastěji se vyhodnocují harmonické do 50. harmonické čili 2,5KHz, přičemž nejsilnější účinek má 5. a 7. harmonická (od 250Hz do 350Hz). [3] [6]

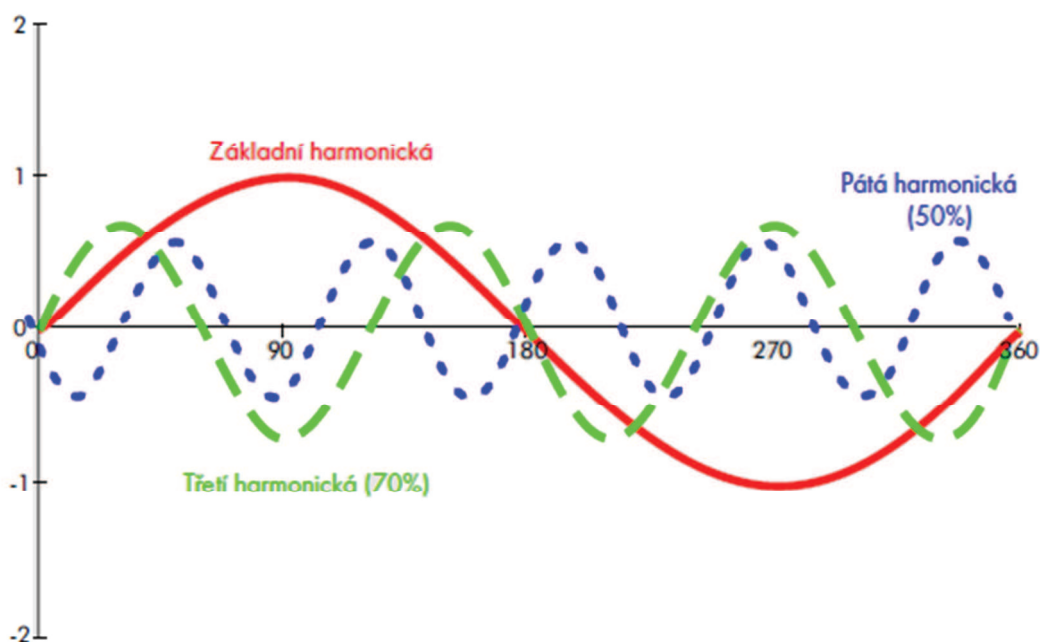
2.2.1 Základní pojmy

harmonická (složka):

Je definována jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady periodického signálu, přičemž složka 1. řádu Fourierovy řady je základní harmonická.

řád harmonické:

Je celé číslo, vyjadřující poměr kmitočtů harmonické a základní harmonické.



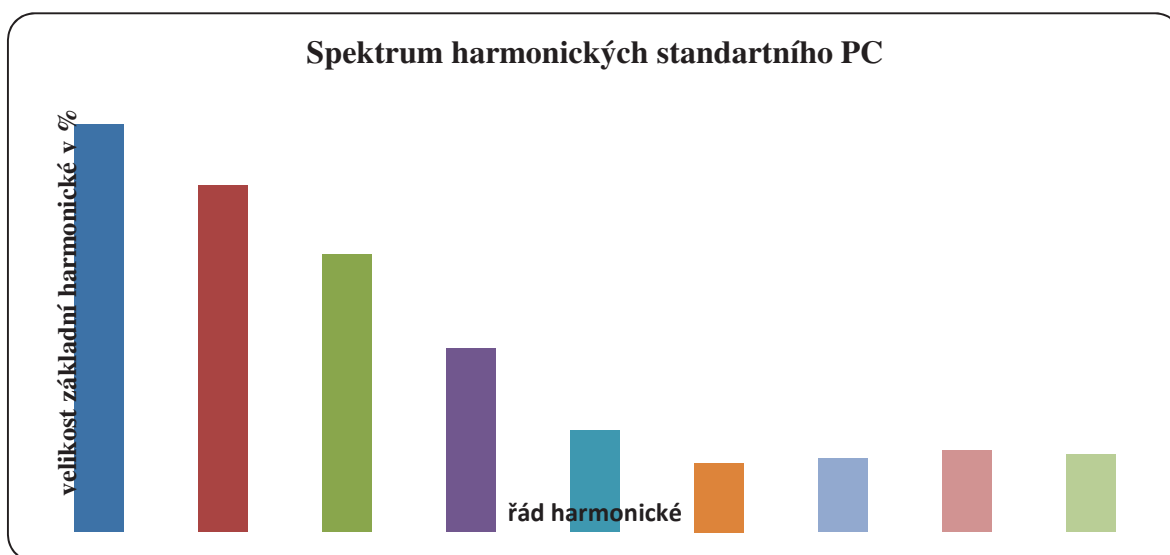
Obrázek 3: Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou

Harmonické vytvářejí například spotřebiče:

- spínané napájecí zdroje (SMPS)
- elektrické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL
- malé zdroje nepřerušitelného napájení (UPS)
- elektronické regulované pohony
- usměrňovače [4].

Ukázka zařízení vytvářející vyšší harmonické:

Většina moderních elektronických zařízení už dnes používá spínané napájecí zdroje. Tyto zdroje se vyznačují především menšími rozměry a hmotností, ale nevýhodou je tvorba právě harmonických vyšších řádu. [4]



Obrázek 4: Spektrum harmonických standartního PC

Za normálních provozních podmínek má být v libovolném týdenním období 95 % deseti minutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 1. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší.

Omezení na řád 40 je dohodnuté. [2]

Tabulka 2: Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_n pro řády harmonických až do 25.

liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %
5	6	3	5*)	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

*) V závislosti na druhu sítě mohou být hodnoty třetí harmonické podstatně nižší.

POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.

Veličina, která popisuje celkové zkreslení sinusového signálu se nazývá THD a je definovaná jak pro proud, tak i pro napětí. [2]

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100(\%) \quad (2-15.)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100(\%) \quad (2-16.)$$

Harmonické proudy a napětí v elektrických sítích mohou způsobovat například:

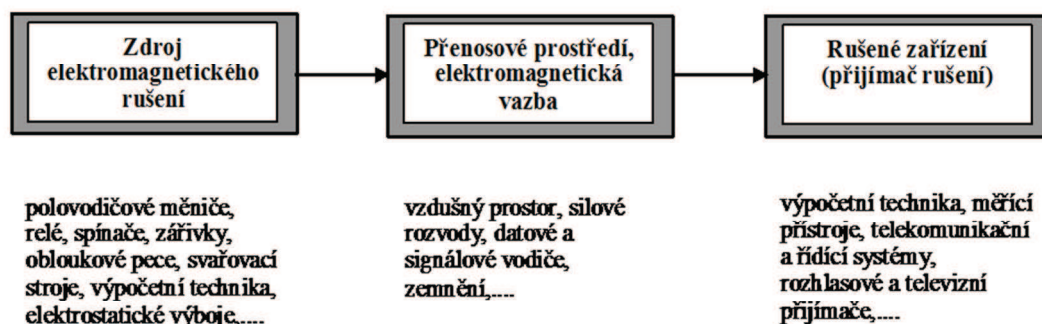
- rušení
- přetížení středního vodiče
- přehřátí transformátoru
- rušení při spínání vypínačů
- přetěžování kompenzačních kondenzátorů
- skinefekt
- nárůst chyb měřicích a jisticích přístrojů [4].

Přístroje vytvářející harmonické, snižují zásadně kvalitu elektrické energie v síti. Elektrické přístroje pak mohou být rušeny, dochází k výpadkům nebo přístroje vykazují „nevysvětlitelné chyby.“

2.2.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Je to schopnost zařízení, přístroje nebo systému pracovat správně i v prostředí, ve kterém působí zdroje elektromagnetického rušení a současně svým provozem negativně neovlivňuje jiná zařízení. [6]

Základní schéma EMC:



Obrázek 5: Základní schéma elektromagnetické kompatibility

Zdroj rušení:

Zařízení méně citlivé na rušení a naopak generující vyšší úroveň rušení

Přijímač rušení:

Zařízení více citlivé na rušení a naopak generující nižší úroveň rušení

Úroveň vyzařování:

Úroveň elmag. rušení vyzařovaného konkrétním zařízením

Mez vyzařování:

Předepsaná max. úroveň vyzařování zdrojem elmag. rušení

Kompatibilní úroveň:

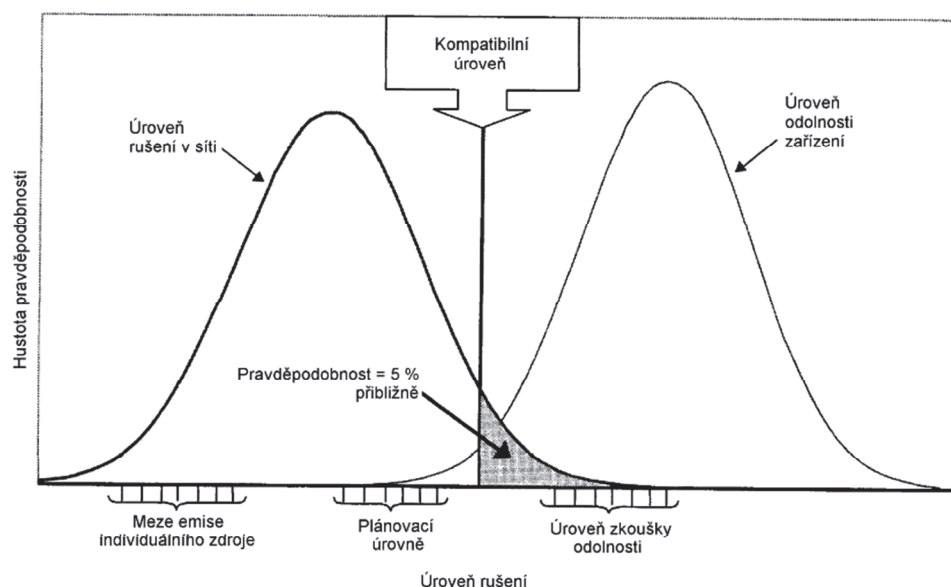
Předepsaná max. úroveň rušení o níž se předpokládá, že již bude ovlivňovat zařízení

Mez odolnosti:

Nejnižší předepsaná úroveň odolnosti

Úroveň odolnosti:

Max. úroveň elmag. rušení působícího na konkrétní zařízení bez ovlivňování kvality jeho provozování. [6].



Obrázek 6: elektromagnetická kompatibilita.

2.2.3 Způsoby odstranění vyšších harmonických

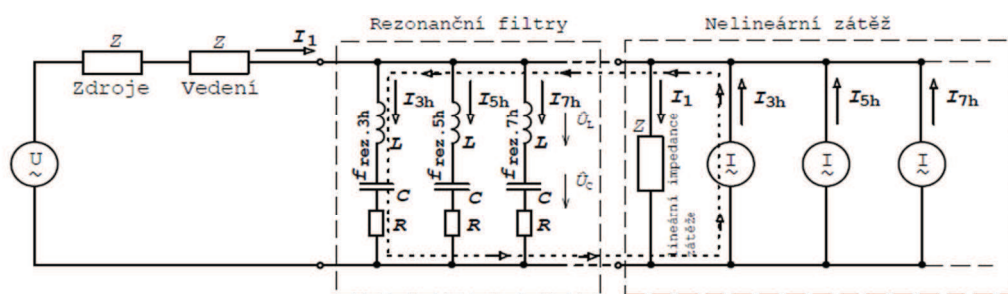
Nejčastějšími způsoby pro omezení zpětných vlivů na síť jsou: [6].

- střídavými tlumivkami zapojenými na vstup měniče do série s napájecím zdrojem
- stejnosměrnými tlumivkami zapojenými ve stejnosměrném meziobvodu měniče
- použitím vícepulzních usměrňovačů, tj. 12, 18 nebo 24-pulzními systémy
- použitím usměrňovače s pulzně šířkovým řízením ve struktuře měniče namísto neřízeného diodového

- vstupní pasivní filtry harmonických
- aktivními filtry
- napájením z oddělených zdrojů nebo z vyhrazených transformátorů

Pasivní filtry:

Používají se pro případy vysokých nároků popř. požadavků na provozování sítí bez vyšších harmonických. Filtry se vyrábí z pasivních součástek, jako jsou například cívky a kondenzátory. Na straně sítě snižují harmonické sériové rezonanční obvody zapojené paralelně k zátěži a naladěné na harmonické kmitočty. [7]



Obrázek 7: Schéma filtrace harmonických proudů paralelními rezonančními filtry

Při rezonanci platí:

$$X_L = X_C \quad (2-17.)$$

$$\frac{f_{rez}}{f_N} \cdot \omega \cdot L = \frac{1}{\frac{f_{rez}}{f_N} \cdot \omega \cdot C} \Rightarrow f_{rez} = \frac{f_N}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2-18.)$$

kde

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2-19.)$$

X_L a $X_C \Rightarrow$ induktivní a kapacitní reaktance pro základní harmonickou. [7] [12]

Aktivní filtry:

Jsou vhodné pro odlišné kompenzační metody korekce kvality sítě pro některé spotřebiče, které vytvářejí vyšší harmonické. Aktivní filtry analyzují proud vyšších harmonických od nelineárních spotřebičů a dodávají kompenzační proud v protifázi pro celkové spektrum od 2. do 25. harmonické nebo na cíleně navolenou harmonickou. Odpovídající proud vyšších harmonických bude v připojovacím bodě tak zcela neutralizován. [11]

2.2.4 Metody zjištění vyšších harmonických v síti

2.2.4.1 výpočet

Každou periodickou funkci $[f(t) = f(t + T)]$, pokud splňuje Dirichletovy podmínky lze, rozložit v tzv. Fourierovou řadu (Fourier series), tzn. rozložit na součet periodických jednoduchých funkcí (elementární harmonické funkce sinus a kosinus). Je-li znám analytický průběh periodické funkce, lze přímo vypočítat koeficienty a_n , b_n (resp. S_n , φ_n) harmonických složek. [6] [7]

Jestliže funkce $f(x)$ vyhovuje rovnici:

$$f(x) = f(x + 2\pi) = [f(x + k \cdot 2\pi)] \quad (2-20.)$$

Nejznámější periodické funkce jsou:

$\sin(\omega t)$ a $\cos(\omega t)$ kde $x = \omega t$

pak tuto funkci nazýváme periodickou s periodou 2π

Pro kmitočet f je $\omega = 2\pi f$ a perioda funkce $T = 1/f = 2\pi/\omega$ pak

$$\sin(\omega(t + K \cdot T)) = \sin(\omega(t + K \frac{2\pi}{\omega})) = \sin(\omega t + 2K\pi) = \sin \omega t \Rightarrow \text{funkce}$$

je periodická.

Periodickou funkci lze aproximovat pomocí goniometrického polynomu:

$$\varphi_n(x) = b_0 + \sum_{K=1}^n [a_K \cdot \sin(Kx) + b_K \cdot \cos(Kx)]$$

Pomocí metody nejmenších čtverců:

$$\int_0^{2\pi} [f(x) - \varphi_n(x)]^2 \cdot dx = \int_0^{2\pi} [F]^2 \cdot dx = MIN \quad (2-21.)$$

Neznámé koeficienty se určí z parciálních derivací:

$$\frac{\partial F}{\partial b_0} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial a_K} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial b_K} = 0 \quad (2-22.)$$

$$b_0 = \frac{1}{K} \sum_0^K y_i \quad (2-23.)$$

$$a_n = \frac{2}{K} \sum_0^K y_i \cdot \sin(n \cdot x_i) \quad (2-24.)$$

$$b_n = \frac{2}{K} \sum_0^K y_i \cdot \cos(n \cdot x_i) \quad (2-25.)$$

Pro limitní operaci $n \rightarrow \infty$ dostaneme rozvoj ve Fourierovu řadu, přičemž periodická funkce musí splňovat tzv. Dirichletovy podmínky tj.:

- funkce musí být omezená
- jejích bodů nespojitostí, maxim a minim je jen konečně mnoho

Metoda pro výpočty v praktické elektrotechnice je nepoužitelná.

2.2.4.2 měření:

V dnešní době poskytují síťové analyzátory ty nejmodernější prostředky pro měření kvality elektrické energie. Analyzátory jsou vybaveny nejrozličnějším příslušenstvím a jsou nejčastěji řešeny jako stavebnicový systém. Výsledky monitoringu kvalitativních parametrů elektřiny umožňují dokumentovat a analyzovat naměřené data ve vybraných místech rozvodné soustavy. [6].

Základní problémy:

- jak dlouho měřit – 2–3 dny, obvykle týden
- jak často vyhodnocovat – měřicí intervaly
- způsob vyhodnocení – 95% úrovně

Měřicí intervaly:

Rozlišujeme „čas sledování“ a „efektivní měřicí čas“

Efektivní měřicí čas:

Odpovídá efektivnímu trvání, uvnitř kterého jsou harmonické měřeny (tj. součet po sobě následujících se časů trvání oken), mezery mezi časy oken, jestliže existují, nejsou započítávány.

Čas sledování:

Je celkový reálný časový úsek odpovídající efektivnímu měřicímu času sledování. Doporučuje se používání následujících časových intervalů: [6].

- velmi krátký interval (T_{vs}): 3 s
- krátký interval (T_{sh}): 10 min
- dlouhý interval (T_L): 1 hodina
- jednodenní interval (T_D): 24 hodin
- jednotýdenní interval (T_{WK}): 7 dní

3 Přehled analyzátorů firmy BK Elcom

Přenosné analyzátory kvality elektřiny:

Přenosné analyzátory kvality elektřiny jsou určeny pro časté používání na různých místech distribuční soustavy na všech napěťových hladinách. Přenosné analyzátory mají velký počet rozsahů na napěťových a proudových vstupech. Proudů se měří proudovými kleštěmi v klasickém provedení s magnetickým obvodem nebo prostřednictvím Rogowského cívky. [3]

3.1 ENA510 (PMU + PQA)

Analýzátor sítě BK-ELCOM v provedení ENA510 je umístěn v odolném plastovém kufříku. Konstrukce přístroje je extrémně mechanicky odolná a vhodná pro měření v terénu. Přístroj umožňuje monitorovat jeden či dva čtyřfázové systémy napětí a proudů. Proudů jsou měřeny pomocí proudových kleští. Jednoduché ovládání umožňuje vestavěná dotyková obrazovka.



Obrázek 8: Síťový analyzátor ENA510 (PMU + PQA)

3.2 PNA571

PNA571 obsahuje bateriový napájecí zdroj s UPS funkcí, včetně externího AC adaptéru a dvou „Hot-swap“ baterií pro cca 2 hodiny provozu. Přístroj umožňuje monitorovat čtyři napěťové a čtyři proudové kanály s možností použití přímého proudového vstupu nebo proudových kleští. Jednoduché ovládání umožňuje vestavěná dotyková obrazovka. [10]



Obrázek 9: Síťový analyzátor PNA571

Analyzátory kvality elektřiny pro trvalou instalaci:

Pevně instalované analyzátory (někdy také nazývané jako stacionární analyzátory) jsou určeny pro trvalé monitorování kvality elektřiny např. v rozvodnách mezi předávací a distribuční soustavou.

3.3 ENA075

Model ENA075 je nejjednodušším analyzátozem v produktové řadě firmy BK-ELCOM. Slouží pro základní monitorování a analýzu kvality elektřiny. Přístroj je svou jednoduchou konstrukcí přizpůsoben pro montáž na DIN lištu nebo na panel. [10]



Obrázek 10: Síťový analyzátor model ENA075

- je vybaven třemi napěťovými a třemi přímými proudovými vstupy
- lze jej vybavit LED displejem. Model s displejem se nazývá ENA175
- jeho konfiguraci a vyčítání naměřených dat lze provádět s využitím vestavěných komunikačních rozhraní

3.4 ENA330 (PQA)

Model ENA330 je kompaktní analyzátor kvality elektřiny bez displeje. Přístroj je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Proudů se měří nepřímo použitím klasických proudových kleští s železným jádrem nebo flexibilních Rogowského cívek – AmpFLEX. Model ENA330 obsahuje výkonné PC a záložní napájení pro přibližně jednu minutu provozu.



Obrázek 11: Síťový analyzátor ENA330 (PQA)

3.5 ENA440 (PQA)

Model ENA440 se skládá z PC v kompaktní skříni a externí jednotky úpravy signálu BK-SCM-01A. Modul BK-SCM-01A slouží pro úpravu 16 analogových signálů a poskytuje také až 64 digitálních vstupů. ENA440 je ideálním prostředkem pro trvalou instalaci na rozvodnách a pro monitorování několika 3-fázových soustav jediným přístrojem. [10]



Obrázek 12: Síťový analyzátor ENA440 (PQA)

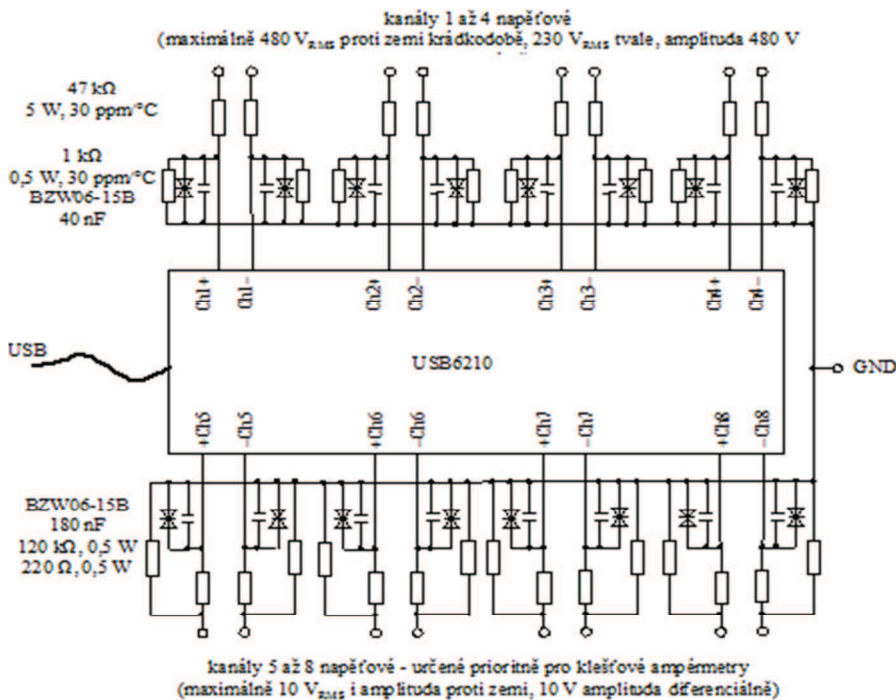
4 Měření kabelové trasy měřírny USMXXI

V praktické části diplomové práce se dlouhodobě měřily elektrické veličiny napětí a proudů. V následující kapitole budou rozebrány naměřené hodnoty naměřené v měřírny USM XXI Poruba ve dnech 5.5. - 12.5.2014. K měření byl použit níže popsany měřicí přístroj a vyhodnocení naměřených dat bylo následně provedeno v kancelářském balíčku Microsoft Office 2010.

4.1 Popis měřicího hardwaru

4.1.1 Přípravek s převodníkem USB6210

Jedná se o přípravek, jehož jádrem je převodník USB6210 od firmy National Instruments, ve kterém jsou vstupy připojeny přes jednoduché odporové děliče, nebo přímo přes malé ochranné rezistory. Přepět'ová ochrana je tvořená pomocí transilů, vstupy jsou vybaveny jednoduchým RC filtrem typu dolní propust 1. řádu (nastaveným na 4 kHz). Celý přípravek je, včetně převodníku USB6210, umístěn do jedné krabičky. [12]



Obrázek 13.: Schéma vnitřního zapojení přípravku USB6210



Obrázek 14.: Přípravek USB6210 uložený v krabici

Přípravek má čtyři napěťové vstupy s rozsahem do 480 V proti zemi (RMS) a čtyři přímé vstupy pro připojení malých napětí do 10 V. Rozsahy se mohou změnit i pomocí změny nastavení převodníku USB6210 na menší vstupní rozsah. Rozsah 480 V je maximální hodnota pro krátkodobé zatížení kvůli špatnému odvodu tepla z uzavřené krabice. Pro trvalý chod se předpokládá napětí do 230 V. Přípravek je určen pro měření v sekundárních obvodech měřicího transformátoru, při napětí 100 V. Proto byl kalibrován pro tuto hodnotu, při vyšších napětích může mít větší chybu. Chyby měřicího přípravku jsou velmi malé 0,1 % napětí a 0,2 % proud.

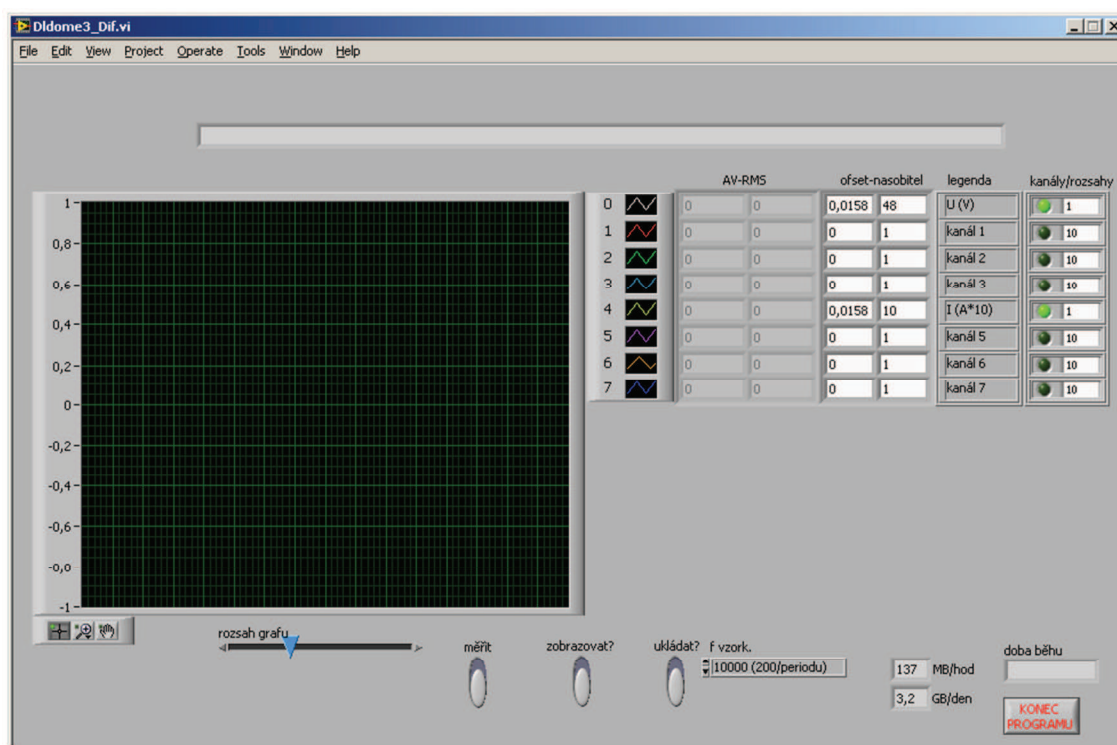
4.2 Popis měřicího softwaru

K vytvoření softwaru bylo použito vývojové prostředí LabVIEW firmy National Instruments (NI). Výhodou LabVIEW je, že je určen hlavně k vytváření měřicích aplikací, ale lze v něm naprogramovat teoreticky cokoli. National Instruments vyrábí velkou škálu hardwaru pro měření a sběr dat, což zaručuje vysokou kompatibilitu vývojového prostředí a hardwaru. Proto bylo zvoleno pro měření právě LabVIEW. [12]

4.2.1 Aplikace pro dlouhodobé měření

Pro měření byla vytvořena aplikace, fungující jako vícekanálový záznamník. Naměřená data se ukládala na disk počítače do souboru ve formátu WAV. Vzorkovací kmitočet bylo možno nastavovat v rozmezí od 1 000 do 40 000 vzorků/s. Počet kanálů je dán konkrétním použitým měřicím hardwarem, pro nejčastěji používaný převodník USB6210 je to 8 kanálů, případně 16 kanálů. Celková měřicí rychlost se dělí počtem kanálů, takže čím méně bude měřicích kanálů, tím vyšší může být vzorkovací rychlost. Na začátku ukládaných dat na disk je umístěna hlavička, která obsahuje čísla měřených kanálů, jejich rozsahy, přepočítávací konstanty, vzorkovací frekvence a případně uživatelem zadaná pojmenování jednotlivých kanálů. Za hlavičkou následují data v binární podobě 16-bitových čísel, z důvodu úspory místa na disku, jejich objem by byl několikanásobně větší. Nevýhodou je pak nutnost dalšího

speciálního softwarového vybavení pro práci s naměřenými daty. Prakticky lze říci, že maximální velikost souboru je omezena možnostmi konkrétního operačního a souborového systému. Program vytváří každou hodinu nový soubor, z důvodu bezpečnosti dat při případné havárii počítače a také pro snadnější práci s menšími a kratšími soubory, soubory je možné následovně ukládat za sebe do větších souborů, než je pouze jedna hodina. [12]



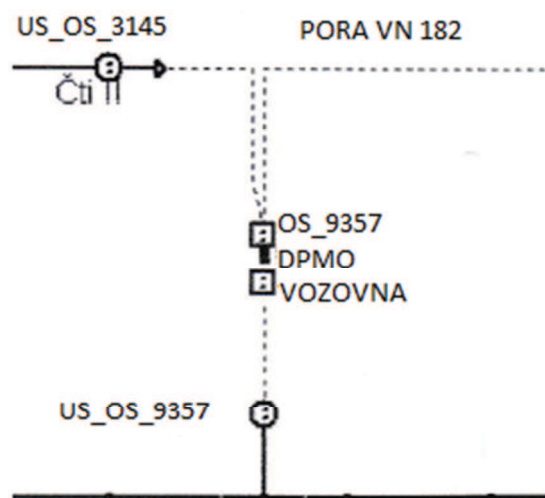
Obrázek 15.: Program pro dlouhodobé měření – čelní panel

4.2.2 Aplikace pro prohlížení naměřených dat

Tento program umožňuje prohlížet zaznamenané časové průběhy, ukazuje také efektivní a střední hodnotu z momentálně zobrazeného úseku. Zobrazuje najednou 10 000 naměřených vzorků, což představuje u nejčastěji používaných vzorkovacích rychlostí 10 kS/s jednu sekundu záznamu. Záznam delší než několik sekund není vhodný, protože je málo přehledný. Program je vhodný pro prohlížení malých časových detailů. [12]

4.2.3 Aplikace pro základní analýzu naměřených dat

V aplikaci lze provádět výpočty (odečty) efektivních, středních, maximálních a minimálních hodnot naměřených průběhů a také jejich harmonickou analýzu. Po určitém počtu



Obrázek 17.: VN napájecí schéma měčírny USM XXI.

Tabulka 3.: Značení přívodních linek DPO a ČEZ

Značení přívodních linek měčírny D.P.Ostrava a.s				Přeznačení linek ČEZ		
Název D.P.Ostrava		Název SME	Rozvodna	OS	Přívodní linka č.1	Přívodní linka č.2
Poruba	XXI.	DPO Poruba vozovna	Třebovice	OS_9357	US_OS_9357	US_OS_3145 a PORA VN 182

V měčírně Poruba je instalován jeden suchý transformátor s jmenovitým zdánlivým výkonem 400 kVA. Primární strana je napájena 22 kV ze sítě distributora ČEZ. Výstupní napětí na sekundární straně je 400 V s proudem 577,35 A. Jedná se o typ transformátoru se 3 fázemi o frekvenci 50 Hz a izolaci třídy F, který byl vyroben v roce 2010 s typovým označením TX3R24, chlazení transformátoru je provedeno přirozeným prouděním vzduchu AN.



Obrázek 18.: Transformátor vozovny v měníně Poruba.

Od transformátoru vozovny vedou 2 přívodní kabely typu AYKY 3x240x120 mm² do rozvaděče vozovny, kde se dále větví do dvou kobek. Jedna kobka napájí vozovnu tramvají a druhá napájí vozovnu autobusů. Z rozvaděče vedou 3 kabely typu AYKY 3x120x70 mm². Celková délka kabelů z měnirny až do rozvaděče na vozovně autobusů je cca 450m.



Obrázek 19.: Přívodní kobka z měnirny v rozvaděči vozovny

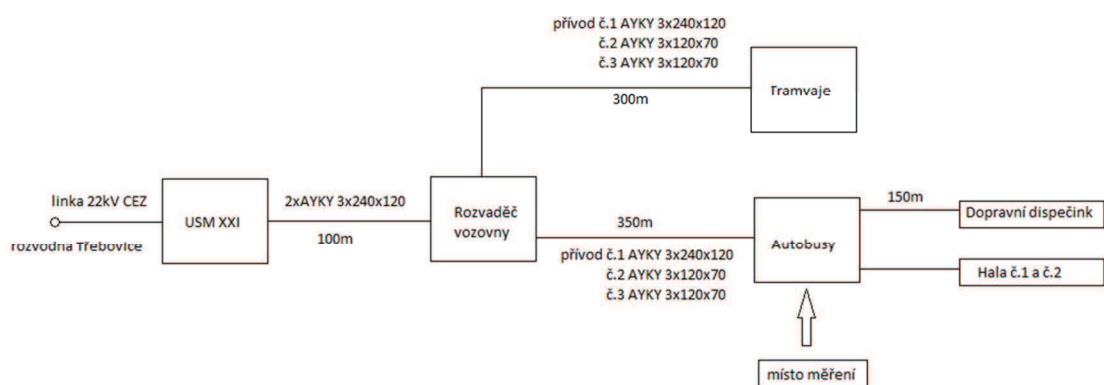


Obrázek 20.: Odvodní kabely do rozvaděče autobusů



Obrázek 21.: Měřící místo v rozvaděči.

Rozvaděč napájí v halách č.1 a č.2 vzduchotechniku o výkonu 30 kW, kompresory, válcovací stolice o celkovém výkonu 31 kW a celou elektroinstalaci haly autobusů, další odběr je tvořen dispečinkem se servery a výpočetní technikou ve vzdálenosti cca 150m od rozvaděče.



Obrázek 22.: Topologie vozovny

4.4 Vyhodnocení naměřených dat

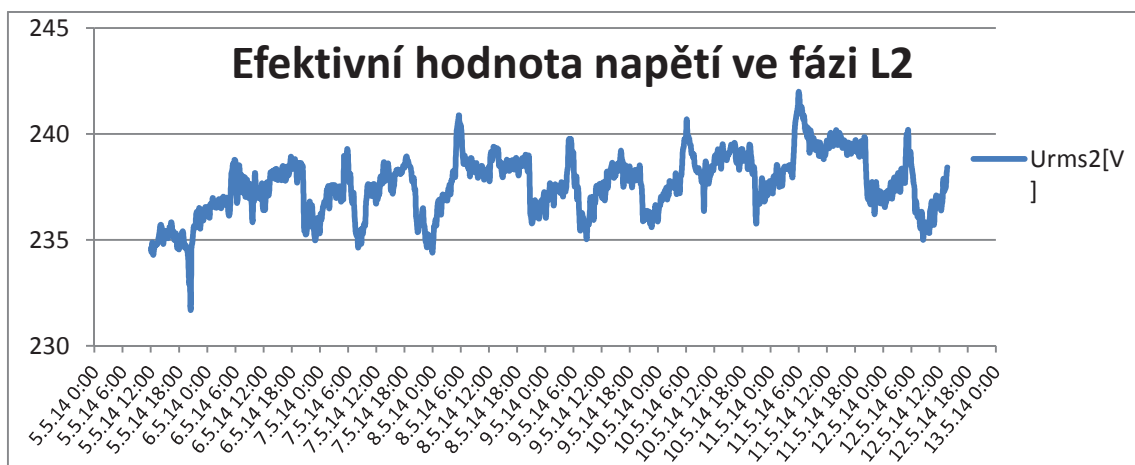
Jednotlivé grafy byly vytvořeny z naměřených hodnot, data byla vložena do tabulkového editoru Excel a graficky vyhodnocena. Čas záznamu byl po jedné sekundě, z důvodu velkého počtu dat a dle normy ČSN EN 50160, kdy se měření má provádět během 10 min. intervalů, byly naměřené hodnoty zprůměrovány do 10 min. úseků.

4.4.1 Efektivní hodnota napětí

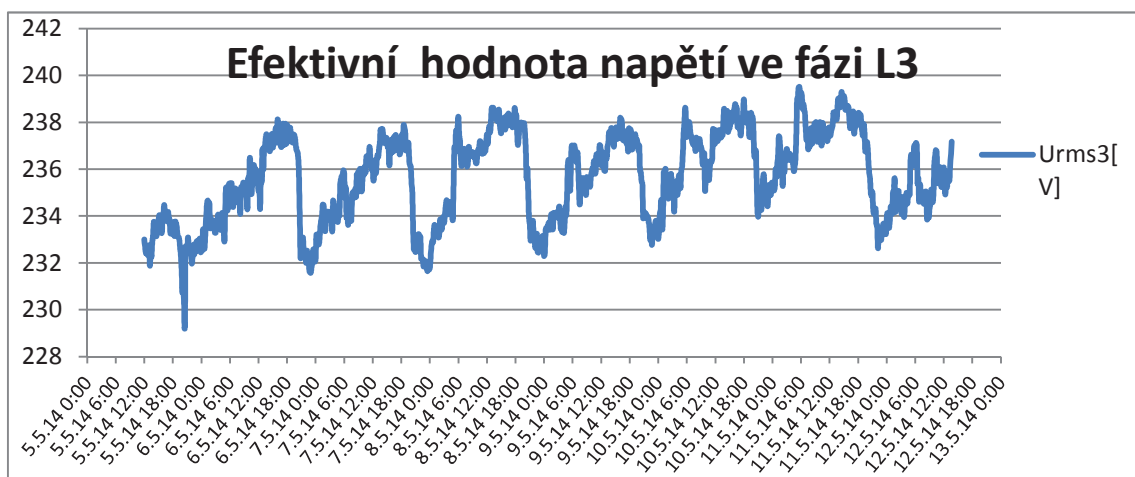
V následujících obrázcích 23 – 26 jsou graficky zobrazeny výsledky měření průběhů efektivních hodnot napětí ve fázích L1, L2 a L3.



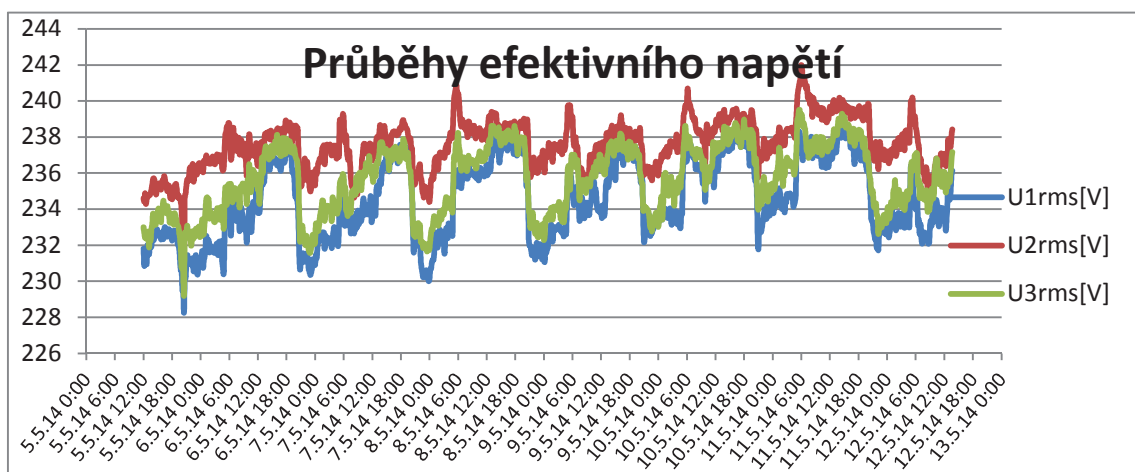
Obrázek 23.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L1



Obrázek 24.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L2



Obrázek 25.: Efektivní hodnota napětí ve fázi L3



Obrázek 26.: Průběhy napětí ve fázích L1, L2 a L3

Tabulka 4.: Tabulka maximálních a minimálních hodnot v jednotlivých fázích.

Max Urms 1	238,6V
Min Urms 1	228,2V
Max Urms 2	241,9V
Min Urms 2	231,7V
Max Urms 3	239,5V
Min Urms 3	229,2V

Poklesy napětí v síti jsou definovány pomocí efektivní hodnoty napětí a základními charakteristikami jsou:

- trvání napětového poklesu
- nejmenší poměrné napětí v době poklesu napětí

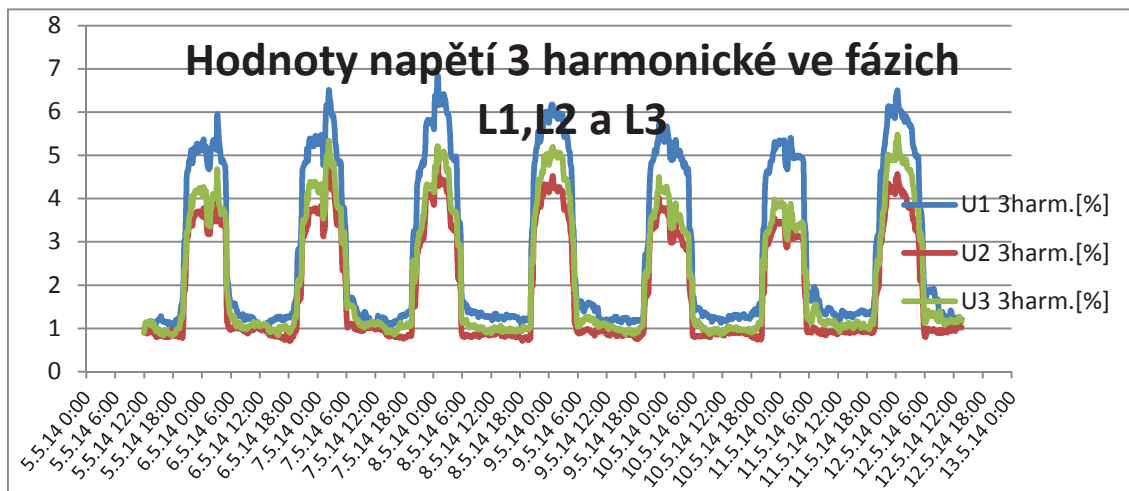
Z tabulky vyplývá, že nejnižší minimální hodnota napětí po dobu měření byla 228,2 V ve fázi L1 a nejvyšší maximální hodnota napětí byla 241,9 V ve fázi L2. Naměřené hodnoty vyhovují požadavkům normy na napětí v rozsahu $\pm 10\%$.

4.4.2 Harmonické napětí

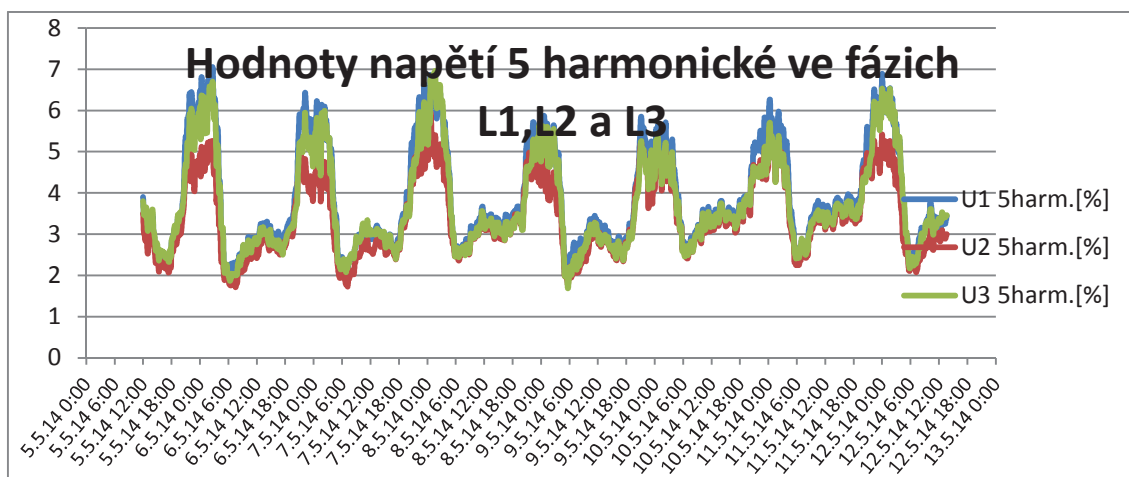
Obrázky 27 - 29 popisují průběhy 3. harmonické složky (150 Hz), 5. harmonické složky (250 Hz) a 7. harmonické složky (350 Hz), které mají největší účinky na síť.

musí splňovat parametry normy:

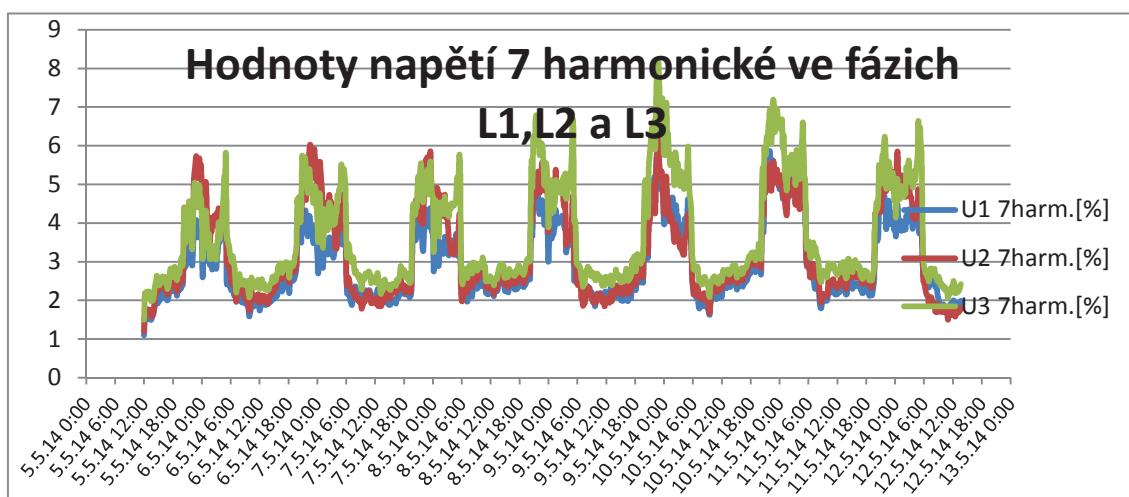
Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 2.



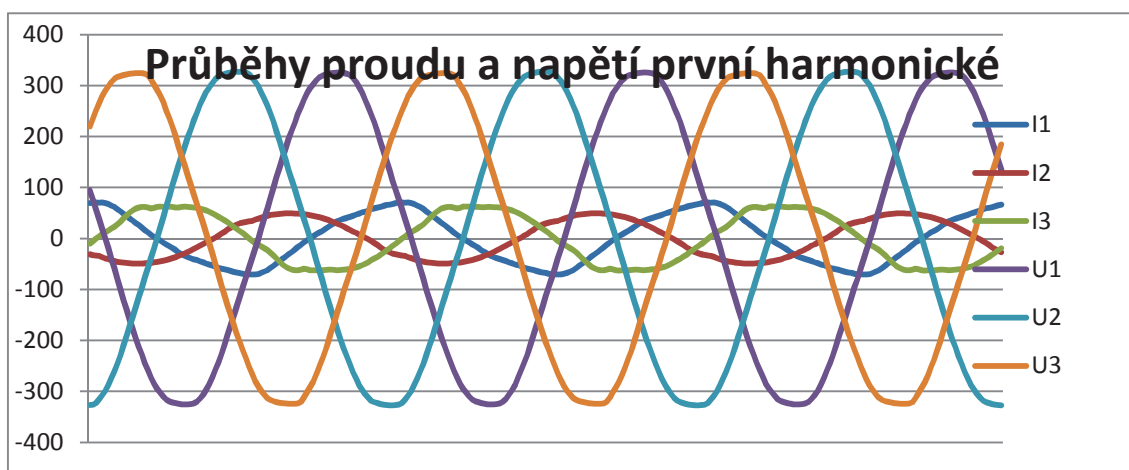
Obrázek 27.: Průběh 3. harmonické napětí



Obrázek 28.: Průběh 5. harmonické napětí



Obrázek 29.: Průběh 7. harmonické napětí



Obrázek 30.: Časové průběhy napětí a proudu za tři periody ve fázích L1, L2 a L3

Z obrázku 30 je viditelné celkové harmonické zkreslení sinusovek proudu ve fázích. Nelineární spotřebič zpětně ovlivňuje (deformuje) průběh napájecího napětí a takto deformované napájecí napětí může negativně ovlivňovat chod dalších připojených spotřebičů. Z tohoto důvodu jsou normami stanoveny limity pro harmonické v odebíraném proudu spotřebičů.

Tabulka 5.: 95% hodnoty harmonických napětí.

Harmonické									
Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160	Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
3	5	L1	5,95	nevyhovuje	15	0,5	L1	0,29	vyhovuje
		L2	4,24	vyhovuje			L2	0,3	vyhovuje
		L3	4,93	vyhovuje			L3	0,4	vyhovuje
5	6	L1	6,21	nevyhovuje	17	2	L1	0,31	vyhovuje
		L2	5	vyhovuje			L2	0,24	vyhovuje
		L3	5,94	vyhovuje			L3	0,24	vyhovuje
7	5	L1	4,91	vyhovuje	19	1,5	L1	0,16	vyhovuje
		L2	5,33	nevyhovuje			L2	0,2	vyhovuje
		L3	6,16	nevyhovuje			L3	0,27	vyhovuje
9	1,5	L1	0,73	vyhovuje	21	0,5	L1	0,2	vyhovuje
		L2	0,76	vyhovuje			L2	0,19	vyhovuje
		L3	0,91	vyhovuje			L3	0,24	vyhovuje
11	3,5	L1	0,74	vyhovuje	23	1,5	L1	0,17	vyhovuje
		L2	0,58	vyhovuje			L2	0,15	vyhovuje
		L3	0,67	vyhovuje			L3	0,16	vyhovuje
13	3	L1	0,41	vyhovuje	25	1,5	L1	0,2	vyhovuje
		L2	0,32	vyhovuje			L2	0,24	vyhovuje
		L3	0,4	vyhovuje			L3	0,14	vyhovuje

Z tabulky 5 je zřejmé, že vykreslené harmonické 3., 5. a 7. nevyhovují normě ČSN EN 50160. Pro podrobnější rozbor harmonického zkreslení, je výhodnější měření zopakovat měřicím přístrojem, který má platný kalibrační list. Překročení maximální procentní hodnoty harmonických, bylo jen o několik desetín procent. Před návrhem filtrace vyšších harmonických, která nebude nejlevnější.

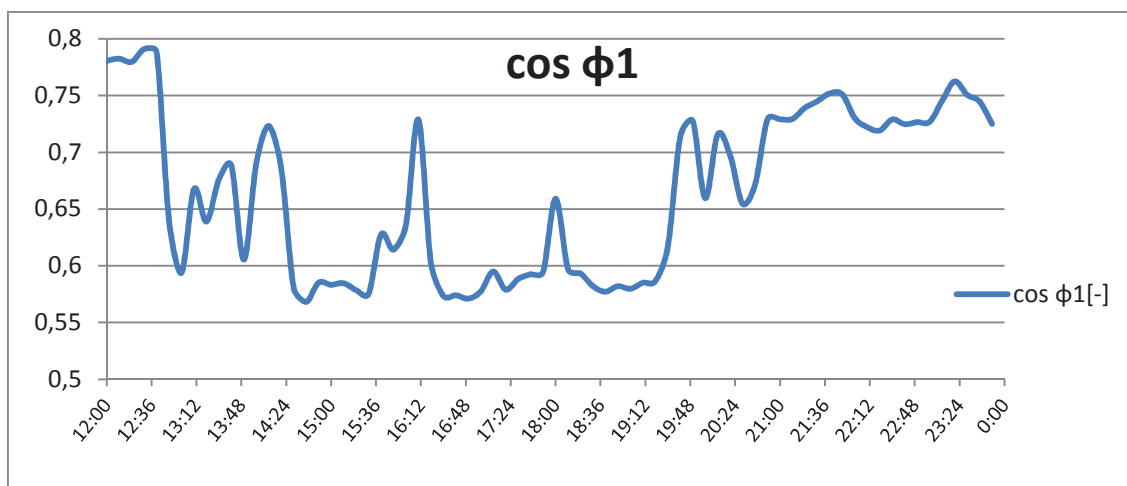
Pro zajímavost je přidána tabulka č.6 naměřených harmonických složek proudu, které nejsou normou přímo definovány, z tohoto důvodu nejsou vyhodnoceny, zda vyhovují normě či nikoli.

Tabulka 6.: 95% hodnoty harmonických proudů.

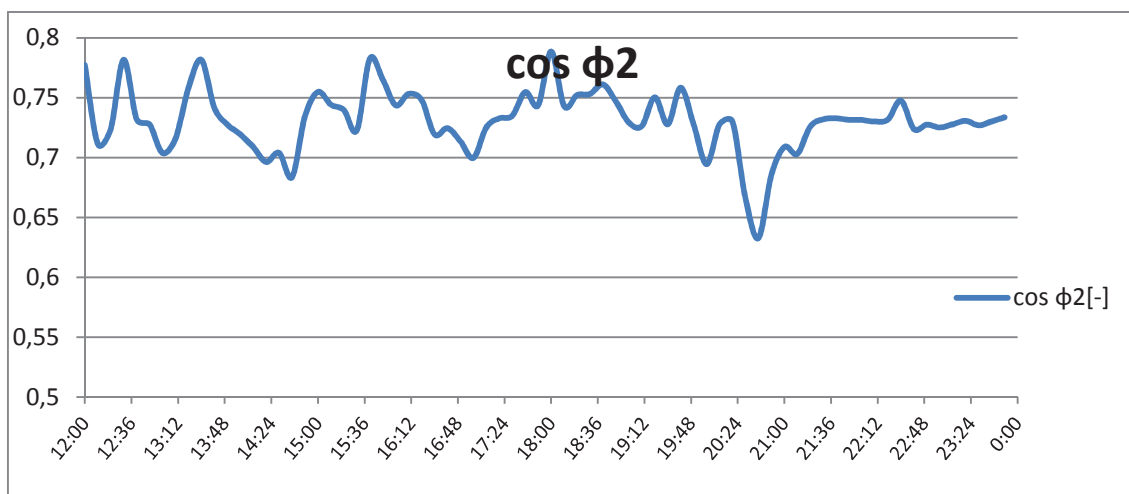
Harmonické proudy					
Řád	Fáze	95% hodnoty	Řád	Fáze	95% hodnoty
3	L1	14,85	15	L1	0,35
	L2	6,56		L2	0,28
	L3	10,01		L3	0,44
5	L1	6,02	17	L1	0,23
	L2	1,94		L2	0,21
	L3	6,91		L3	0,24
7	L1	6,54	19	L1	0,1
	L2	3,98		L2	0,14
	L3	9,19		L3	0,14
9	L1	1,22	21	L1	0,1
	L2	0,73		L2	0,09
	L3	1,1		L3	0,14
11	L1	0,44	23	L1	0,09
	L2	0,57		L2	0,1
	L3	0,65		L3	0,1
13	L1	0,62	25	L1	0,09
	L2	0,35		L2	0,09
	L3	0,6		L3	0,1

4.4.3 Fázový posun první harmonické

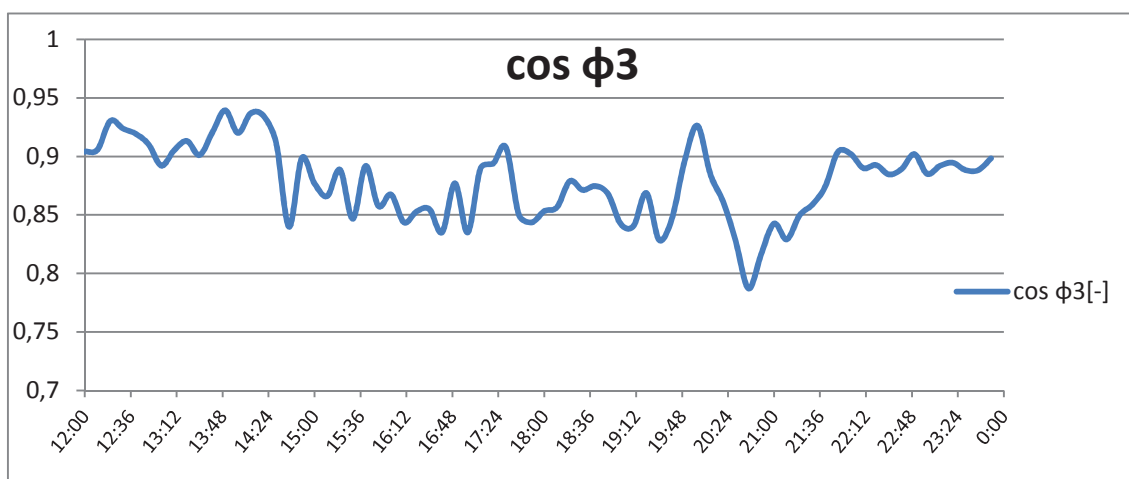
Podle velikosti účinníku rozlišujeme induktivní nebo kapacitní charakter. V síti se hodnota účinníku udržuje na hodnotě $\cos\varphi=0,95$. Pokud této hodnoty nedosahujeme, musíme síť kompenzovat.



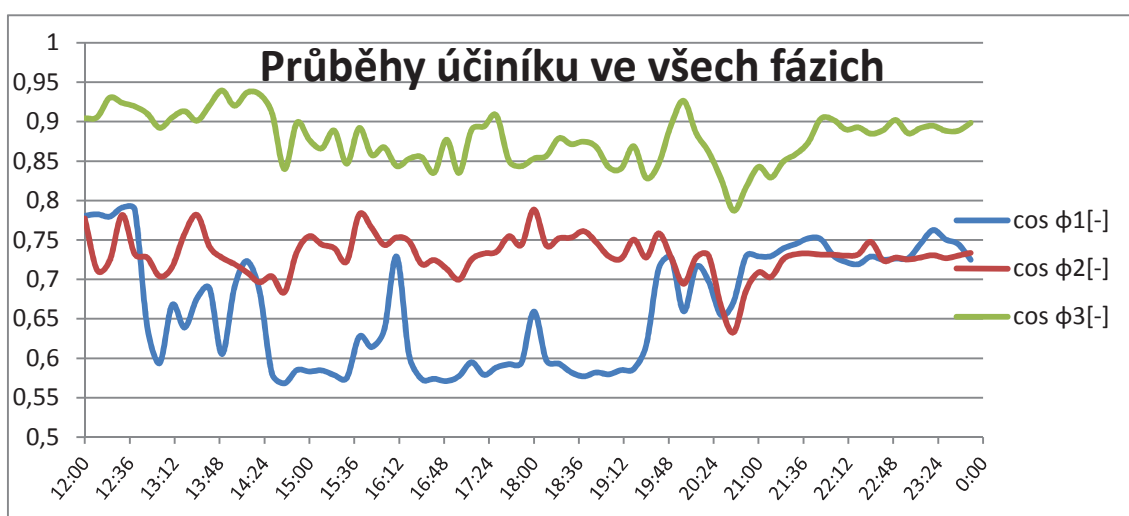
Obrázek 31.: Průběh účinníku první fáze za prvních 12 hodin měření



Obrázek 32.: Průběh účinníku druhé fáze za prvních 12 hodin měření



Obrázek 33.: Průběh účinníku třetí fáze za prvních 12 hodin měření



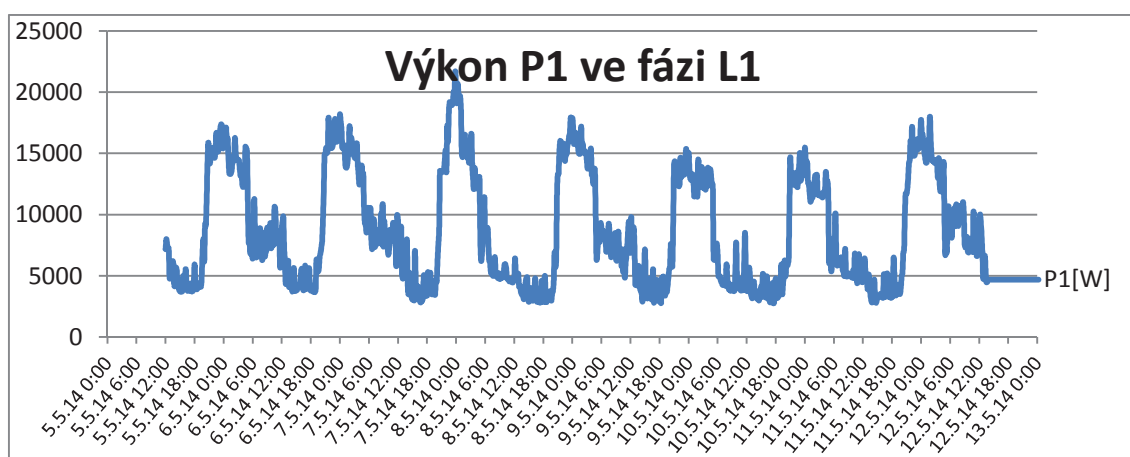
Obrázek 34.: Průběhy účinníku ve všech fázích za prvních 12 hodin měření

Tabulka 7.: Maximální a minimální hodnoty účinníku za celou dobu měření.

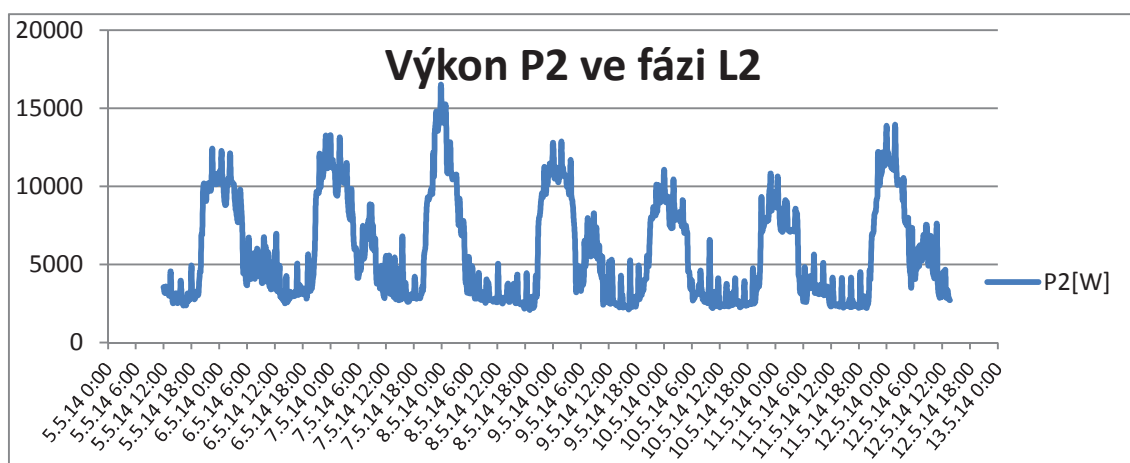
max cos φ_1	0,855327
min cos φ_1	0,533457
max cos φ_2	0,820528
min cos φ_2	0,575117
max cos φ_3	0,959306
min cos φ_3	0,707018

4.4.4 Průběh výkonu

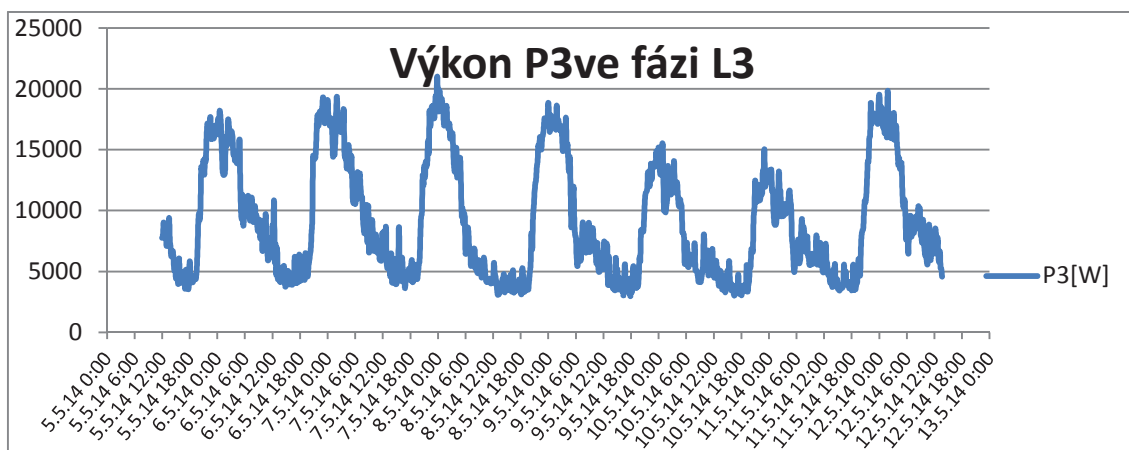
V následujících obrázcích 35 - 38 jsou graficky zobrazeny výsledky měření pro průběhy činných výkonů a obrázky 39 - 42 zobrazující průběhy jalového výkonu.



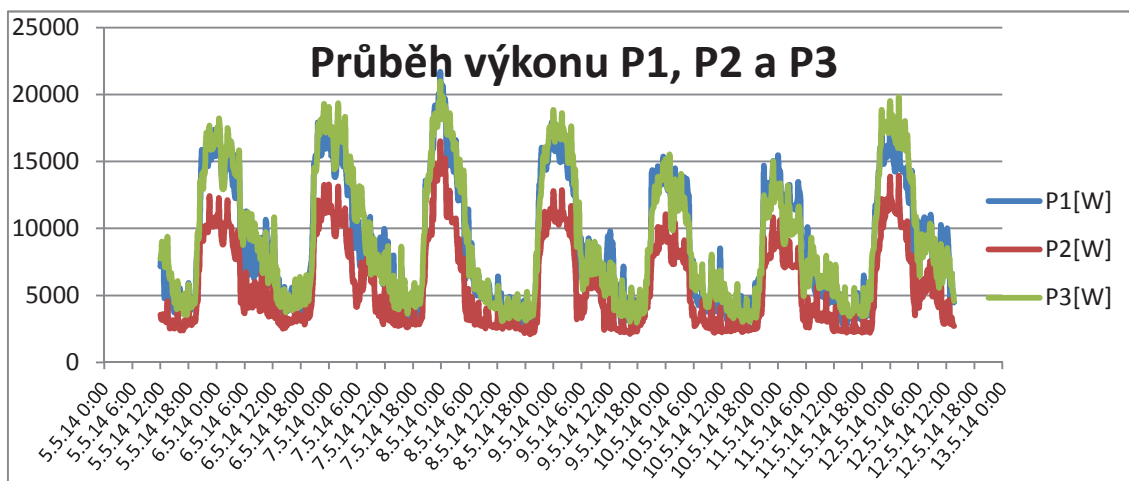
Obrázek 35.: Průběh činného výkonu ve fázi L1



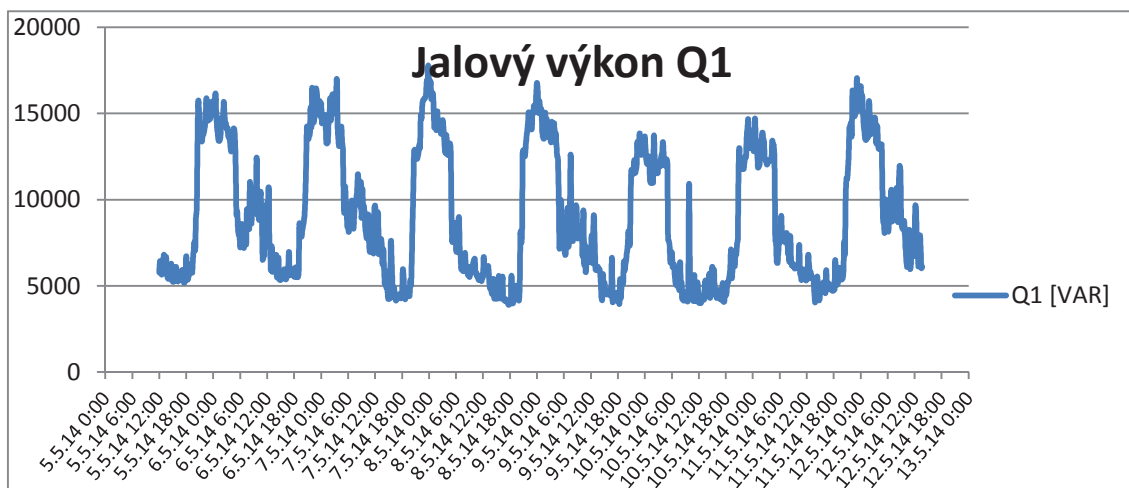
Obrázek 36.: Průběh činného výkonu ve fázi L2



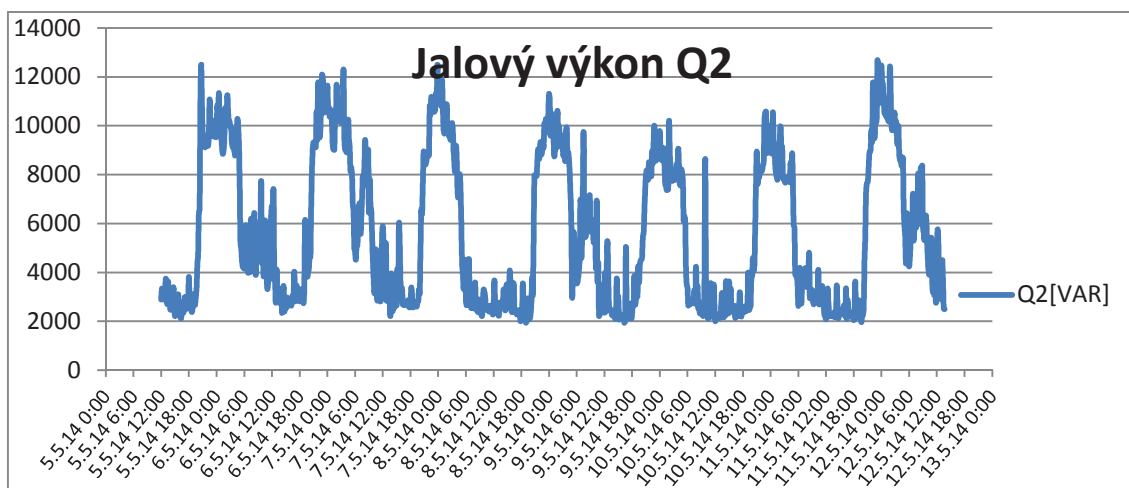
Obrázek 37.: Průběh činného výkonu ve fázi L3



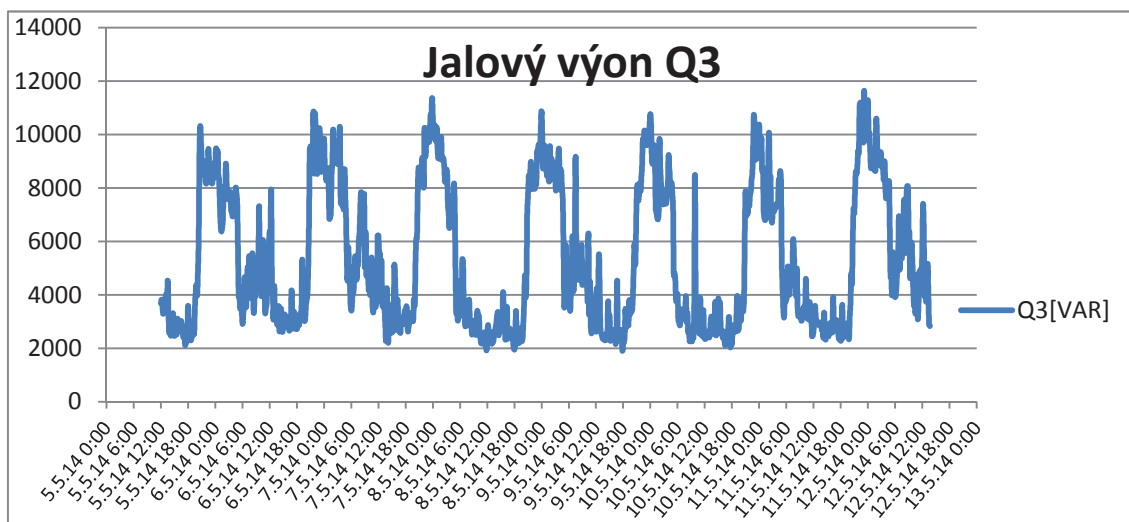
Obrázek 38.: Průběhy výkonů P1, P2 a P3



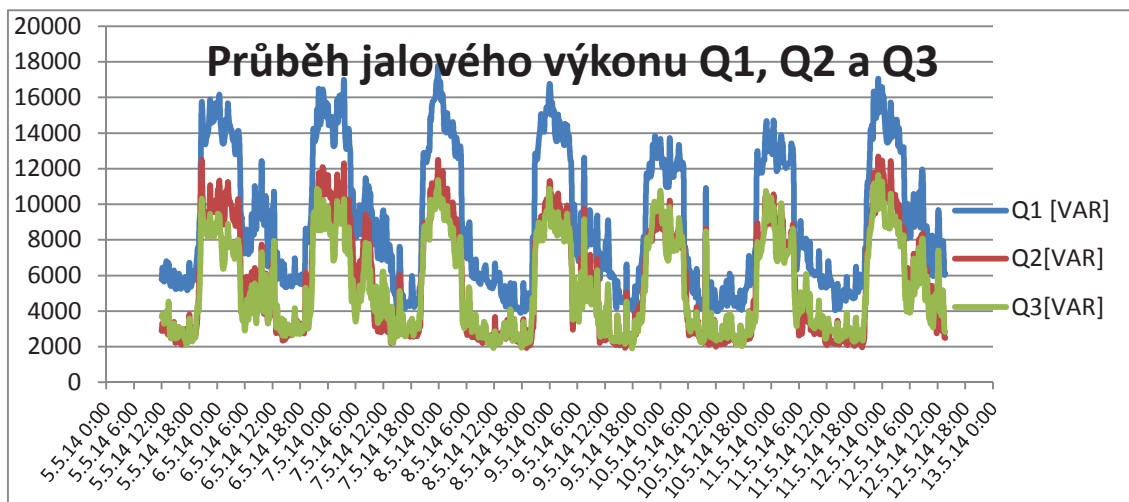
Obrázek 39.: Průběh jalového výkonu ve fázi L1



Obrázek 40.: Průběh jalového výkonu ve fázi L2



Obrázek 41.: Průběh jalového výkonu ve fázi L3



Obrázek 42.: Průběhy jalových výkonů Q1, Q2 a Q3

5 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo analyzovat problematiku výpadků počítačové techniky v areálu tramvajové vozovny v Ostravě - Porubě, kde bylo provedeno měření základních parametrů kvality elektrické energie ve dnech 5.5. - 12.5.2014.

V první části diplomové práce se zaměřuji na teoretický rozbor kvality elektrické energie dle charakteristik a požadavků normy ČSN EN 50160. Dále jsem v diplomové práci rozvedl problematiku měření kvality elektrické energie s uvedeným přehledem síťových analyzátorů od firmy BK ELCOM.

Praktická část práce se zabývá vyhodnocením naměřených dat. Měření bylo provedeno v 1s intervalech z důvodů velkého objemu dat, byly zprůměrovány do 10 minutových intervalů a následně zpracovány v kancelářském balíčku Microsoft Office 2010. Vyhodnoceny byly:

- liché harmonické proudy a napětí
- účinník
- efektivní hodnota napětí
- přenášený činný a jalový výkon

Z vyhodnocení dle tabulky 5 je patrné, že maximální míra harmonických napětí byla překročena jen o velice málo v 3., 5. a 7. harmonické. Pro podrobnější rozbor harmonického zkreslení by bylo výhodnější měření zopakovat a to pomocí měřicího přístroje, který má platný kalibrační list. Proto že překročení minimální procentní hodnoty harmonických, bylo jen o několik desetin procent. Harmonické složky proudů nejsou žádnou normou přímo definovány a jsou uvedeny pouze pro zajímavost.

Cílem měření, bylo zjistit zda-li, poklesy napětí v síti jsou natolik vysoké, aby ovlivnily funkci počítačů na dispečerském stanovišti. Po provedeném měření je zřejmé, že poklesy napětí nejsou natolik výrazné, aby přímo ovlivňovaly funkce počítačů, minimální hodnota napětí byla 228V a maximální 240V. Nicméně měření neprobíhalo za stejných podmínek, při, kterých docházelo k výpadkům počítačů. Před měřením byla preventivně přenastavená odbočka transformátoru VN/NN o 7V. Od té doby nebyly hlášeny žádné další výpadky počítačů. Z toho lze usuzovat, že zvýšení napětí odbočky mělo vliv na výpadky počítačů, i když spínané zdroje jsou obvykle schopné pracovat ve velmi širokém rozsahu napětí. Dále lze ještě uvažovat o tom, že rušivý vliv, který způsoboval výpadky počítačů, nastával "náhodně", (jednou za dlouhou dobu) a v průběhu našeho měření se proto nevyskytl. Je též možné, že tento rušivý vliv se v současné době již nevyskytuje vůbec, z nám blíže neznámých příčin. Přenášený výkon je tvořen především nočním odběrem na osvětlení areálu vozovny autobusů a hal, výbojkami o výkonu 2 kW. Největší odběr je od 20:00 hodin večer do 05:00 hodiny ráno kolem 20 kW v nejzatíženější fázi. Byl sice zjištěn nízký účinník (menší než 0,95), ale ten platí v místě uvnitř areálu vozovny mezi místem transformace 22 / 0,4 kV a místem měření je ještě 350m dlouhé kabelové vedení, které svou kapacitou účinník v místě připojení k VN mírně vylepšuje.

Použitá literatura

- [1] Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu tyristorových zařízení
- [2] ČSN EN 50160
- [3] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37250.pdf>
- [4] <http://www.medportal.sk>
- [5] Učební texty ing. Tomáš Kostka
- [6] ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA Prof. Ing. Pavel SANTARIUS, CSc.
- [7] Bakalářská práce Miroslav Morcinek
- [8] PNE 333430
- [9] Učební texty elektroenergetika 2 Stanislav Rusek
- [10] www.elcom.cz
- [11] http://www.pronix.cz/aktivni_filtry.html
- [12] Kolář V., Kocman S.: Filtration of harmonics in traction transformer substations, positive side effects on the additional harmonics. Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), Warszawa, ISSN 0033-2097, Vol. 87, NR 12a/2011.